農業氣象災害調查與防護技術
土壤水分境況對土壤及水稻生育之影響
153-166, 2003

土壤水分境況對土壤及水稻生育之影響

李健择*[1]、陳世雄[2]
[1]行政院農業委員會臺中區農業改良場作物改良課
[2]國立中興大學農藝學系
E-mail:lijiafen@tdais.gov.tw

摘要 ---------- 156

一、前言 ---------- 156

二、土壤水分境況對土壤理化性質之影響 ---------- 156

三、土壤水分境況對水稻生理之影響 ---------- 159

四、土壤水分狀況對水稻生育之影響 ---------- 161

五、結語 ---------- 163

六、引用文獻 ---------- 164

ABSTRACT ---------- 168

土壤水分境況對土壤及水稻生育之影響

李健捀[*1]、陳世雄[2]
[1]行政院農業委員會臺中區農業改良場作物改良課
[2]國立中興大學農藝學系
E-mail:lijiafen@tdais.gov.tw

摘要

國內育成之水稻推廣品種，於水稻生育初期耐旱性低，稉稻品種耐旱性又較秈稻品種爲差。水稻生育初期仍以湛水管理，對於養分的有效性及吸收利用效益較大。但二期作應提早於移植後第 29 天進行晒田管理，以改善不良的土壤環境障礙。幼穗形成期間及抽穗期間，應給予充足之灌溉水。在穀粒充實期，適當減少灌溉水，可以得到較高的產量。提高土壤水分張力，亦有降低白米中粗蛋白質含量之效果。因此水稻於生育後期，當水稻植株有累積過量氮素時，可利用適當的排水管理，以降低水稻對氮素的吸收，對稻米品質將有顯著的提升效果。

關鍵詞：水稻、土壤、土壤水分境況、產量、稻米品質。

一、前言

臺灣的稻作栽培面積約爲 34 萬公頃(農業統計年報, 2000)，估計一般栽培水稻平均每期作總需水量約爲 124 公分(Kung, 1971)，因此臺灣每年使用在水稻栽培的總需水量約爲 42 億公噸。如此巨量的用水量，卻在水稻栽培的過程中，大部分以蒸散、蒸發及滲漏等方式而流失，眞正被水稻吸收利用的僅佔一小部分，因此對水分的使用而言，水稻是極爲不經濟的作物。但是減少灌溉用水，改變土壤水分張力，會引起土壤氧化還原系統的改變，影響土壤養分的有效性。同時因水分變化，也將導致土壤穿刺阻力改變，而影響水稻根系的伸展，進而影響水分及養分的吸收，使得水稻植株的各項生理功能受影響。經由改變土壤水分張力所引起的連鎖反應，最後可以表現在水稻的生育及產量上。

二、土壤水分境況對土壤理化性質之影響

水稻生長所需要的水分及養分大部分需依賴根部自土壤中攝取。因此欲使水稻生長良好，土壤必須提供適宜的環境，以利水稻根系發揮功能。水稻在生長期間，土壤長期處於浸水狀態，土壤浸水後，其物理、化學和生物性質皆隨之改變，而影響水稻生長。浸水使大氣和土壤間的氣體交換減緩，氧氣在水中的擴散速率爲空氣中的萬分之一，使得土壤從有氧狀態轉變爲無氧狀態，造成土壤氧化還原電位下降，土壤中的 NO_3^-、Mn^{4+}、Fe^{3+}及 SO_4^{2-} 等離子因接受電子，而產生各種還原物質。土壤物質還原次序依序爲 O_2、NO^-、Mn^{4+}、Fe^{3+}及 SO_4^{2-}(Patrick and Mahapatra, 1968)。Takai *et al.* (1956)指出土壤浸水後，一天之內氧氣幾乎全

部消失，造成土壤的還原狀態。Black(1968) 指出在無氧氣存在的情況下，氧化還原電位爲水田還原程度最好的指標，它可提供土壤中化學和生物變化的訊息。水田在還原情況下，鐵和錳的氧化物因還原而溶解度增加，使土壤中 Fe^{2+}和 Mn^{2+}濃度提高(Gotoh and Yamashita, 1966; Ponnamperuma, 1972)。土壤中 Fe^{2+}、Mn^{2+}的增加，對於水稻吸收這兩種元素是有利的(Clark *et al.*, 1957)。而且 Fe^{2+}和 Mn^{2+}可以將交換位置的 K^+和其他陽離子交換出來，增加這些陽離子的有效性(Ponnamperuma, 1967)。但是 Fe^{2+}、Mn^{2+}濃度過高對水稻會造成毒害(Ponnamperuma, 1955)。土壤中磷的有效性可因浸水而增加，這是因爲氧化還原電位下降導致難溶的磷酸鐵，因鐵的還原而溶解所致。在還原狀態下，鉀較易溶解，尤其在含有大量的 Fe^{2+}及 Mn^{2+}的土壤，因爲 Fe^{2+}和 Mn^{2+}將 K^+交換出來所致(IRRI, 1963; Ponnamperuma, 1976)。窒息病是目前國內第二期作水稻生育初期普遍發生之生理病害，其原因爲一期稻草掩埋不當，導致土壤累積過量未腐熟有機質，在湛水情況下造成氧化還原電位急速降低，使土壤中還原過多的有毒物質，致使根系壞死，嚴重影響地上部水稻植株生育甚至死亡(圖 1)。

圖 1. 未腐熟稻草於土壤中醱酵，抑制水稻之生長。

Jugsujinda and Patrick (1977)在水稻營養生長期間，以不同氧化還原電位及 pH 處理，觀察水稻對鐵、鋅、錳及磷之吸收情形，指出在低氧化還原電位，鐵的吸收較好，鋅則在低還原狀態下，溶解度及吸收皆降低，且隨著氧化還原電位的下降而吸收愈少。錳的吸收則顯著受到鐵的影響，當鐵吸收增加時，錳吸收減少。pH 值對磷的吸收有顯著的影響，在 pH 較低的情況下，氧化還原電位高者較還原電位低者磷吸收較好，當 pH 值提高則磷的吸收降低，可能由於鐵的溶解度降低，形成不溶解性磷酸鐵有關。土壤在浸水後，酸性土的 pH 會上升，鹹性土則下降，經過 2～3 週後達一穩定 pH 值，大約在 6.5～7.2 之間(Ponnamperuma, 1972)。土壤在浸水環境下，氧化還原電位逐漸降低，土壤中的氮素主要以 NH_4^+型態存在，和土壤粒子結合，不易淋洗，容易被水稻根系吸收，因此對氮素的有效性較高。當提高土壤水分張力，使得氧化還原電位升高後，NH_4^+因爲硝化作用轉變成 NO_3^-，而 NO_3^-則會因土壤再浸水，容易被淋洗，或經過還原層，因爲脫氮作用，造成氮的損失。Patrick and Wyatt(1964)指出若浸水與乾燥交替將造成 15～20%土壤全氮的損失，Reddy *et al.* (1976)亦有相同的結果。Tolley *et al.* (1986)指出，在低氧化還原狀態下，氮的吸收量最多，當氧化還原電位爲-200 mv 時，根對氮的吸收量最多，並且隨著氧化還原電位的提升，吸收量逐漸減少。對土壤之全氮含量則有相反的影響，當氧化還原電位爲-200 mv 時，其土壤的全氮含量最少，氧化還原電位提高至+500 mv，土壤全氮含量最高。土壤全氮含量與植株內的含量呈相反的關係，顯示當植株吸收減少時，土壤之全氮殘存量相對地提高。土壤中有機質具有均衡及緩慢供應作物生長所需之營養要素成分(王等，1993)、改良土壤物理化學性質(Su, 1987； Fortun *et al.*, 1989； Reganold, 1989)、

維護土壤微生物相與活性，以及減少地下水污染(鄧及黃，1993)等益處。李(2002)於水稻穀粒充實期間進行排水管理，於水稻收穫後調查土壤之理化性質變化行爲，結果 0.03 及 0.06 MPa 二種土壤水分境況管理，土壤中之有機質含量及磷含量均顯著較 0.00 MPa 之處理降低，顯示在乾濕交替的土壤水分管理下，土壤中有機質較容易被分解(表 1)。

表 1. 穀粒充實期間土壤水分境況對土壤理化性質之影響(1998 年二期作及 1999 年一期作)。

Soil moisture regime	pH	O.M. %	Exchangeable K_2O	Exchangeable Ca0	Exchangeable MgO	P_2O_5	Fe	Mn	Zn	Cu	EC
			mg/kg soil								mmhos/cm
	Second crop										
0.00MPa	7.66c	4.77a	64b	3394b	352b	51a	573a	135b	50a	9.22a	0.468a
0.03MPa	7.91b	3.90b	61b	3895a	389a	41b	556a	141b	29b	9.33a	0.489a
0.06MPa	8.00a	3.91b	78a	3875a	365ab	43b	563a	158a	48a	9.11a	0.484a
	First crop										
0.00MPa	7.54c	5.30a	63a	3607c	371a	53a	377ab	139c	42b	9.00a	0.532a
0.03MPa	7.76a	4.99b	62a	3920b	338b	38b	363b	153b	37b	8.67b	0.422c
0.06MPa	7.71b	5.20ab	66a	4230a	338b	44b	388a	168a	67a	8.78ab	0.506b

Means with the same letter of a column are not significantly different at 5% level by Duncan's MRT for crop, respectively.

根據 IRRI(1978)的報告指出，水稻在浸水的環境下，當土壤總體密度超過 1.2 g/cm^3，根的伸長速率會受到抑制，當土壤水分減少時，在更低的總體密度下就會造成抑制。陳(1991)在不同分蘗期曬田，使 30 cm 深度土壤水分張力達到 0.03 MPa 時，土壤剖面最大穿刺阻力由湛水區之 10 kg/cm^2 以下劇昇到 42 kg/cm^2，俟 30 cm 處土壤水分張力達到 0.08 MPa 時，土壤 18 cm 深度穿刺阻力已達到 58 kg/cm^2，因爲穿刺阻力增加，使得提早於 4 本分蘗期曬田處理之水稻台農 67 號，每株根乾重只有 2.92 g，較對照湛水區減少 8%，根長也由湛水區之每株 8,018 cm 減少爲 2,888 cm，減少 64%，磷的吸收量降低 33%。10 本分蘗曬田處理，其根重最重，但根長仍較湛水區減少 52%。曬田後，磷的有效性降低及土壤穿刺阻力增加是抑制水稻分蘗的重要機制。李(1993)亦由盆栽試驗得到證明，水稻營養生長期一期作台中 189 號在 0.02 及 0.04 MPa 土壤水分境況處理下，根重顯著降低 30 及 34%，台中秈 10 號亦分別降低 46 及 39%，而增施氮肥則可以顯著提高水稻根重(表 2)。Yahata(1976)指出土壤穿刺阻力若超過 10 kg/cm^2 時，會限制水稻根生長。Gerard *et al.* (1982)指出，土壤穿刺阻力隨著土壤質地不同而有差異，其以土壤中粘粒含量進行分析，發現根生長的臨界阻力(即根生長停止時之穿刺阻力值)隨著粘土含量的增加而降低。Thangaraj *et al.* (1990)指出， 稻根的生長由於土壤穿刺阻力變化而有極大的差異，在表土下 0～25 cm 土壤中， 根長密度隨著土壤穿刺阻力的增加而逐漸減少， 當土壤穿刺阻力從 0.1 增加至 1.5 MPa 時，其根長密度減少 40%。Lal(1985) 也指出，隨著總體密度由 1.0 g/cm^3 增加到 2.0 g/cm^3 時，水稻根乾重由 1.54 g 降低至 0.5 g，根的穿透深度也降低，由 19.8 cm 降低至 5.2 cm。黃(1982)指出，表土總體密度和有機質含量有極顯著負相關，富含有機質之土壤總體密度較低，根系穿透阻力較小，在晒田後較不易有過度密實的問題。

由上述結果，顯示土壤在浸水情況下，對水稻根系的發展及養分的有效性，均較爲有利。

表 2. 營養生長期土壤水分境況及氮肥施用量對水稻根重之影響(1992 年)。

Soil moisture tension Mpa	Nitrogen fertilizer kg/ha	First crop		Second crop	
		TC189	TCS10	TC189	TCS10
		------------------- g -----------------			
0.00	60	5.8cd	4.9bc	3.4bc	3.6c
	120	7.3bc	5.7b	5.1b	5.5b
	240	11.8a	8.8a	8.1a	9.0a
0.02	60	3.9e	2.8d	2.8c	2.3cd
	120	5.1de	3.1d	3.3bc	2.6cd
	240	8.6bc	3.1d	4.4b	3.6c
0.04	60	3.7e	2.7d	2.7c	3.0cd
	120	4.8de	3.5cd	3.8bc	1.9d
	240	7.5bc	4.7bc	2.5c	2.3cd

Means with the same letter of a column are not significantly different at 5% level by Duncan's MRT for crop, respectively.

三、土壤水分境況對水稻生理之影響

一般作物常利用三種方式來抵抗乾旱的傷害，第一種爲避旱性，植物以縮短生育期的方式避免乾旱的侵襲。第二種爲耐旱性，植物以本身生理的改變，如進行滲透調節(osmotic adjustment)以維持膨壓，使傷害降低，達到存活之目的。第三種爲提高水分利用效率，使收穫指數達到最高。

傳統及改良的陸稻栽培種，一般而言是屬於植株較高、分蘗能力較低，但是具有深根及耐旱的特性。水稻則屬於植株半矮或中高，在適當的水分栽培下，能展現較高的生產能力。基於水稻及陸稻因爲栽培上水分需求的差異，育種選拔的目標也有所不同(Chang and Vergara,1975)。水在植物組織或細胞內的流動，係受水的化學潛勢控制。Slatyer and Taylor(1960)將水的化學潛勢稱之爲水分潛勢(water potential)。O'Toole and Cruz (1980) 以傳統的陸稻栽培種 KP 及水稻栽培種 IR28，在營養生長期間，持續施以 29 天的水分逆境處理，從處理開始第 10 天後，葉片水分潛勢開始顯著降低，IR28 降低的速度較 KP 快，特別在中午時分，IR28 降低的幅度更大。測量參試兩品種的葉片氣孔阻力，則顯示在處理第 10 天以後，葉片氣孔阻力明顯增加，特別是 IR28 的反應更爲激烈，而比較其葉片向軸面(adaxial，即葉表)及背軸面(abaxial，指葉背)的氣孔阻力,發現背軸面的氣孔阻力比向軸面的氣孔阻力高，並且隨著水分逆境處理時間延長，其差距更大。造成水分逆境下，葉片兩面氣孔阻力差異的原因，則是在水分逆境處理第十天以後，葉片開始往向軸面捲曲，使得背軸面所暴露的逆境環境比向軸面劇烈,因此導致背軸面的氣孔阻力比向軸面的氣孔阻力爲高。Dingkuhn *et al.* (1989a)以 Azucena(陸稻)和 IR20(水稻)二品種爲材料，進行三級水分逆境處理，分別每天供水 0.832、0.321 及 0.038 公分，結果也顯示供水量愈少之處理，其淨光合作用速率、葉片氣孔導度及葉片水分潛勢下降愈低，特別在中午降低的幅度最大，兩個參

試品種的反應類似，但是水稻 IR20 的葉片水分潛勢比陸稻 Azucena 低。IR20 葉片水分潛勢在水分逆境下，下降幅度較低，導因於葉片氣孔導度之反應比 Azucena 不敏感，因此氣孔關閉的反應較遲鈍，而有較高的蒸散速率所致。雖然 Azucena 在水分逆境下與 IR20 比較，具有較高的葉片水分潛勢，但 Azucena 在葉片水分潛勢下降到-0.75 MPa 光合作用即開始受到抑制，而 IR20 光合作用則在-1.0MPa 才開始受到抑制，顯示陸稻在水分逆境下，表現出較水稻敏感的光合作用抑制，及較低的葉片氣孔導度。IR20 及 Azuecna 對水分逆境的反應都是經由葉片捲曲，以降低暴露在不利環境中的葉面積，用以降低葉片的蒸散作用，但也因而使得光合作用隨著降低。由葉片捲曲與不捲曲之光合作用對蒸散作用的比值來看，葉片捲曲影響蒸散作用反應比光合作用更明顯，使得稻在水分逆境下，葉片捲曲可以有效改進水分利用效率。

Glaszman(1985)將稻依同功異構酶的多態性 (Isozyme polymorphism)分成六個遺傳族群，印度型稻歸類於第 I 族群，大部分屬於植株半矮、高分蘗和適於水中栽培的；Aus 稻則歸類於第 II 族群，其植株型態和印度型稻相似，但是具有較短的生長期；日本型稻則歸類於第IV族群，大部分屬於植株高、葉長而寬、深根且耐旱。Dingkuhn *et al.* (1989b)以 28 種不同遺傳型稻在種植後第 57 天至 81 天間施以中度的水分逆境處理，結果大部分的 Aus 稻具有較低的葉片水分潛勢，日本型稻則具有較高的葉片水分潛勢，印度型稻居於中間。調查葉片的捲曲程度及氣孔導度與葉片水分潛勢的關係，顯示維持較高葉片水分潛勢的栽培種，具有較高的葉片捲曲程度以及較低的氣孔導度，亦即日本型稻在水分逆境下，對葉片捲曲程度比印度型稻反應更敏感。觀察葉片氣孔導度在水分逆境下的變化，顯示在輕微的水分逆境下，氣孔即具有高度的敏感性。Ludlow(1980)認爲，調整葉片氣孔的啓閉，是作物控制水分過度蒸散之有效方法之一，根據 Henson(1982)的報告，氣孔開始關閉的葉片水分潛勢約在-0.8 MPa 至-1.2 MPa 之間，依栽培種之不同而有差異。調查 28 個不同遺傳型稻在中等水分逆境下的淨二氧化碳同化速率，改良的印度型稻具有較高的淨二氧化碳同化速率，Aus 稻則較低。

植物在缺水下進行滲透調節爲耐旱性重要機制，也是植物適應不良環境重要反應之一。滲透調節具有下列幾種重要的功能：(1)維持細胞的生長。(2)維持氣孔的張開。(3)維持光合作用。(4)增加生產的能力。Turner and Jones (1980)亦認爲在低葉片水分潛勢下，若能經由葉片滲透潛勢之調節作用，使得葉片能維持相當之膨壓，以保持氣孔適度開啓，應有利於作物在乾旱環境下之生長。滲透潛勢之調節，有兩種不同方式：(1)增加細胞內之溶質 (Hsiao *et al.*, 1976; Fereres *et al.*, 1978; Culter and Rains, 1978; Ackerson, 1981)。(2)縮小細胞之容積(Culter and Rains, 1977; Jones and Turner,1978; Ackerson and Hebert,1981)。這兩種方式都能增加細胞內溶質之濃度，進而改變其滲透潛勢，而維持膨壓潛勢。Hsiao *et al.* (1984) 以水稻 IR26 爲材料，從停止灌溉後第 16 天開始，葉片水分潛勢開始顯著降低，從第 20 天開始，處理區比對照區滲透潛勢顯著降低，至處理結束,處理區比對照區高出 0.5 到 0.6MPa 的滲透調節能力。Cutler *et al.* (1980)的試驗也有相同的結果，並且發現在滲細胞的彈性增加。因爲在水分逆境下，細胞具有較高的滲透調節能力，因此當遭遇嚴重乾旱脫水時，可以延遲葉片捲曲或稻株之死亡。

上述結果顯示，水稻在缺水情況下，雖然滲透調節可以發揮適當之功能，使氣孔保持適度之開啓，但是當葉片水分潛勢降低，由於氣

孔導度下降，使得光合作用可能會受到抑制。因此在探討節省灌溉水之水分管理方法時，對不同土壤水分張力處理下，水稻各項生理反應，及其對水稻生育之影響，值得進一步加以探討。

四、土壤水分狀況對水稻生育之影響

水稻的生長可分爲三個主要階段：

1. 營養生長期間(vegetative stage)：自種子發芽至幼穗始原體(panicle primordia)發生。

2. 生殖生長期間(reproductive stage)：自幼穗始原體發生至抽穗。

3. 成熟期間(ripening stage)：自抽穗至完熟。

水稻在營養生長期間，主要進行分蘗的產生以及植體的生長。IRRI(1983)報告指出，大部分地區作物產量減少，與水分缺乏、作物根系發展受阻，而影響地上部之生育有關。陸稻的根粗且分佈深，而且有較高的地下部／地上部生質量之比值，然而大部分高產的水稻品種卻具有短而細，分布較淺的根系(Chang *et al.*, 1972; Parao *et al.*, 1976)。Kawata *et al.* (1977)指出，水稻在長期湛水及間斷灌水栽培下，其冠根數以長期湛水栽培最多，分支根則以間斷灌水栽培較多。Banba and Ohkubo(1981) 將水稻及陸稻施以不同灌溉處理，維持不灌溉處理者，其根系分布在較深層土壤；當土壤水分到達 PF2.5 及 PF2.0 即行灌溉之處理者，根系主要分布在表土層，此現象在一般淺根性之水稻表現尤爲明顯，同時也指出在相同土壤水分張力處理下，水稻在土壤表層 14 公分之根分布約佔 87%，陸稻只有 79%，明顯的表現出水稻之根系較淺，陸稻根系較深之特性。Thangaraj *et al.* (1990)以盆栽試驗持續排水 16 天後，0～20 公分土層穿刺阻力增加至 2.5MPa，使得稻根生長減少 47%。陳(1992) 指出水稻在分蘗期間，排水提高土壤水分張力至 0.08 MPa，分蘗將受到抑制，而顯著減少，同時株高也顯著降低，因爲分蘗數顯著降低，使得產量也顯著降低。1994 年二期作在台中區農業改良場試驗田，使用 8 種秈稻品種及 12 種稉稻品種，於水稻移植後 10 天進行 0.06 MPa 土壤水分境況處理，結果平均株高降低 32.5%，平均穗數則降低 55.8%，稉稻又比秈稻降低的幅度爲大，顯示國內育成的水稻推廣品種，對於水稻生育初期的耐旱性不佳，稉稻又比秈稻的耐旱性爲差(表 3)。李等(1996) 在水稻營養生長期(一期作從插秧後第 14 天，二期作從插秧後第 7 天開始處理)提高 15 公分深土壤水分張力至 0.02 及 0.04 MPa，使得一期作台中 189 號之穗數顯著降低 20.7~29.3%，台中秈 10 號降低 13.9~14.8%；二期作台中 189 號之穗數亦顯著降低 35.9~38.3%，台中秈 10 號則降低 14.4~18.9%。陳等(1996)以 0.01Mpa 土壤水分境況處理盆栽水稻幼苗，試驗結果顯示 0.01MPa 之高土壤水分張力，較湛水可以提高水稻幼苗根活性 65%。秈稻較稉稻有較高的根活性，秈稻在種植後 17 天之根活性，0.01 MPa 高土壤水分張力與湛水處理，分別較稉稻高出 15 及 28%。0.01 MPa 土壤水分張力處理，顯著提昇種植 17 天秈稻之地上部乾重，由每株平均 54 mg 增加至 64 mg，稉稻則沒有顯著差異。

綜合上述結果顯示，水稻生育初期仍以湛水管理較爲有利，不僅田間栽培管理便利，對於養分的有效性及吸收利用效益較大，同時對於雜草的控制較容易。然而，國內第二期作，因高溫及稻草掩埋不當，導致水稻生育初期，土壤中累積過量之微量元素，使水稻生育初期產生養分吸收障礙，導致穗數或一穗粒數顯著降低，而嚴重影響產量等問題，則又必須以適當的排水進行管理。因此水稻生育初期的水分管理，仍存在諸多問題，有待解決。

晒田是水稻栽培過程當中非常重要的工作(特別是水稻有機栽培)，其原因包括：(1)晒田可造成土壤中水份不足，促使水稻根系往下紮根，不僅可以有效預防水稻生育後期倒伏，更可充份利用較深層的土壤養份，有利於水稻後續之生長。(2)晒田可以造成水稻水份及養份吸收不足，而產生生育短暫停滯現象，以有效抑制水稻之無效分蘗及植株過度抽高，並加強植株的硬度，以避免水稻生育後期倒伏。(3)水稻施行有機栽培，土壤因長期湛水造成過度還原狀態，土壤中可能累積有毒物質，不利於水稻生長，晒田則有利於氧化分解。李等(1996)指出一期作在移植後 40 天進行晒田管理，可以使台中秈 10 號及台農 67 號得到最高產量；二期作於移植後 29 天進行晒田管理，可以使台中 189 號最高產量。李等(1996)同時指出，一期作在移植後 36-40 天進行晒田管理，可以降低胴裂粒及屑米率；一期作在移植後 25-28 天進行晒田管理，可以提高完整米率及降低未熟粒，均有助於稻米品質的提升。

表 3. 營養生長期土壤水分境況處理對水稻生育之影響(1994 年二期作)。

Cultivar	0.00MPa Plant height	Panicle	0.06Mpa Plant height	Panicle
	cm	no./hill	cm	No./hill
Taichung Native 1	83.4	12.1	57.4	10.8
Taichung 3	78.0	16.6	66.3	11.0
Taichung 10	93.4	16.1	84.2	7.4
Taichung 17	82.9	13.5	73.1	9.2
Taichung Sen Glutinous 1	88.1	15.6	58.2	8.8
Tai Sen 1	92.5	16.3	79.0	8.1
Tainung Sen 20	93.1	16.4	64.9	9.9
Tainung Sen Glutinous 2	94.9	14.8	75.2	10.0
Mean	**88.3(100)**	**15.2(100)**	**69.8(79.0)**	**7.5(49.3)**
Taichung 65	100.8	13.1	64.0	4.3
Tainung 67	92.8	13.8	47.4	6.7
Kaohsiung 142	88.6	16.7	50.7	5.8
Tai Keng 1	87.1	15.5	52.7	5.8
Tai Keng 2	94.6	14.1	55.4	5.4
Tai Keng 3	90.9	16.5	51.0	5.0
Tai Keng 4	86.5	14.6	45.4	6.4
Tai Keng 5	91.2	12.5	52.0	5.0
Tai Keng 6	92.7	11.6	48.0	4.7
Tai Keng 7	89.2	12.7	53.7	5.6
Tai Keng 8	92.0	15.2	57.7	4.2
Tai Keng 9	100.2	12.0	47.6	5.3
Mean	**92.2(100)**	**14.0(100)**	**52.1(56.5)**	**5.4(38.6)**

水稻生殖生長期間可分為幼穗分化期及抽穗期，此二個時期對水分逆境反應最為敏感。稻之幼穗形成期是穎花分化及一穗粒數決定的時期，此一時期環境因素的改變，將影響產量構成要素之一穗粒數及稔實率。Ofelia and O'Toole(1986) 指出，在花粉形成期間因水分逆境引起稔實率降低，是導致產量降低的主要原因。在減數分裂期間以不同程度的水分逆境處

理，每穗稔實率隨著劍葉水分潛勢降低而直線下降。葉片水分潛勢在-1.1 MPa(對照組)時稔實率爲 80%，當葉片水分潛勢降低至-3.5MPa 時，稔實率降低至 50%，對產量有顯著的影響。經進一步分析花粉母細胞減數分裂過程，在水分逆境下有較多不正常的染色體發生，以及未成熟、白色的小穗發生，萎縮小穗的數目隨著葉片水分潛勢的降低而增加。稻之抽穗期包括穗軸抽出、外內穎開啓及授粉等過程，此時期與產量構成要素之稔實率有關。Cruz and O'Toole(1984)以最大蒸發散量做爲稻株需水的指標，在開花期間當蒸發散量低於最大蒸發散量 30%以上時，即土壤中水分不足最大蒸發散量 30%以上時，產量即呈直線遞減，產量降低的原因爲稔實率下降所致，同時也指出在抽穗期間，葉片水分潛勢與穗軸抽出葉鞘的抽出度有顯著的直線關係，平均約有 30% 的不稔率是由於穗包覆在葉鞘中不能抽出所致。故在抽穗期水分供應不足植株所需時，由於不稔實率增加以及穗抽出困難，造成稔實率的降低，對產量有鉅大的影響。由以上結果說明，無論是在水稻穎花形成期或是抽穗期，均需提供充分的水分，才能得到完整的穎花及穎花數，抽穗及授粉正常完成，以獲得最高的產量。

水稻之穀粒充實期是光合產物急速累積的時期，此期間缺水對於產量構成要素之稔實率及千粒重會有重要的影響，而影響穀粒充實的因子爲光合產物累積速率及累積期間的長短。莖及葉鞘於開花前貯存的光合產物，在缺水而光合作用受限時，可提供作爲穀粒充實的供源(Source)，扮演重要的角色。在開花後第一天至第十天之間以劍葉相對水分含量 95～97%處理，使得處理區由植株開花前所貯存的光合產物轉移至穀粒者佔穀粒乾物質重量 25.6%，而對照區則只佔 14.6%，其餘的光合產物靠葉片在開花後進行光合作用，而後轉運至穀粒中(小葉及高見，1981)。Rahman and Yoshida(1985)在開花後第三天起分別以田間容水量 100%、75%及 50%之土壤水分處理，維持至成熟期結束，結果當水分降低至田間容水量 50% 時，產量明顯降低 16～20%，造成產量降低的主要原因爲穀粒的充實速率降低所致，對穀粒充實期間的長短則沒有影響。李(2002)於水稻穀粒充實期間，施以-0.03 MPa 之土壤水分管理，水稻之產量均降低，顯然進行-0.03 MPa 之排水管理，已影響水稻對養分之吸收(表 4)。李等(1993)在水稻齊穗後提高土壤水分張力(-0.02 及-0.04MPa)處理，經由多項式迴歸分析，顯示在穀粒充實期，適當減少灌溉水，一期作提高土壤水分張力至-0.018 MPa，二期作則提高至-0.027 MPa 做爲灌溉起點，可以得到最高的產量。提高土壤水分張力，則白米中粗蛋白質含量有降低之趨勢，顯示提高土壤水分張力情況下，土壤中有機質礦化所產生之氮素，僅小部份爲水稻吸收利用，大部分可能經由淋洗或脫氮作用而流失(表 4)。因此水稻於生育後期，當水稻植株有累積過量氮素時，可利用適當的排水管理，以降低水稻對氮素的吸收，對稻米品質將有顯著的提昇效果。

五、結語

綜合上述結果顯示，國內育成之水稻推廣品種，於水稻生育初期耐旱性低，稉稻品種耐旱性又較秈稻品種爲差。因此耐旱性水稻品種選育，應考慮增列爲爾後國內的育種目標，已備不時之需。以國內目前推廣之水稻品種而言，水稻對缺水的反應極爲敏感。因爲水稻在不同的生長階段，根系的發展及植株的型態均有差異，對水分的需求及吸收水分的能力必然也不一樣，因此必須針對水稻不同生育時期分階段進行管理，方能獲得合理之稻田水分管理方法。

表 4. 穀粒充實期間土壤水分境況對水稻農藝性狀之影響(1999 年一期作及 1998 年二期作)。

Soil moisture regime	Panicles	Spikelets	Seed setting	1,000-grain weight	Yield	Harvest index
	no./hill	no./ panicle	%	g	kg/ha	
	First crop					
0.00Mpa	10.51b#	140a	89.87a	26.23a	7057a	0.513a
0.03Mpa	10.58b	137a	89.78a	26.28a	6717b	0.521a
0.06Mpa	11.16a	138a	89.05a	25.55b	6597b	0.525a
	Second crop					
0.00Mpa	7.89b#	108a	79.24a	24.40b	3798a	0.449a
0.03Mpa	8.07b	105b	74.73b	24.73a	3577b	0.445a
0.06Mpa	8.95a	107ab	73.79b	24.34b	3665ab	0.420b

#Means with the same letter of a column are not significantly different at 5% level by Duncan's MRT.

表 5. 穀粒充實期間土壤水分境況對水稻碾米品質及化學性質之影響(1999 年一期作及 1998 年二期作)。

Soil moisture regime	Brown rice	Milled rice	Head rice	Amylose	Crude protein	Gel consistency
	------------------------%------------------------					mm
	First crop					
0.00Mpa	80.00b#	71.06a	66.02a	15.39a	6.23a	96.63b
0.03Mpa	80.28a	71.18a	65.13b	14.98b	6.26a	97.69a
0.06Mpa	80.15ab	71.18a	64.86b	15.39a	5.99b	97.36a
	Second crop					
0.00Mpa	79.10a	71.22a	65.85ab	18.81c	6.69a	59.44c
0.03Mpa	79.12a	71.32a	66.25a	20.47b	6.56b	61.89a
0.06Mpa	79.03a	71.06a	65.68b	20.77a	6.52b	60.81b

#Means with the same letter of a column are not significantly different at 5% level by Duncan's MRT.

四、引用文獻

小葉田亨、高見普一。1981。登熟初期の水ストレスがイネの穀實生長，乾物分配および玄米收量に及ぼす影響 日作紀 50(4): 536-545。

王銀波、趙震慶、黃山內。1993。永續性農耕法對土壤性質與養分供應量之影響。p.9-17。永續農業研討會專集。台中區農業改良場編印，彰化縣。

李健揚。1993。土壤水分境況對水稻生育及稻米品質之影響。碩士論文。國立中興大學農藝研究所。

李健揚、陳世雄。1994。營養生長期土壤水分境況對水稻生育之影響—對產量及產量構成要素之影響。臺中區農業改良場研究彙報 42: 29-40。

李健揚、宋勳、陳世雄。1996。營養生長期提早斷水對水稻生育之影響。臺中區農業改良場研究彙報 50: 1-9。

李健揚、宋勳、陳世雄。1996。營養生長期提早斷水對稻米品質之影響。臺中區農業改

良場研究彙報 51:31-39。

李健捀。2002。有機質肥料對土壤及水稻生育之影響。博士論文。國立中興大學農藝研究所。

黃明輝。1982。影響水稻生產之土壤物理性檢定。中華農業研究 31(4): 347-352。

陳世雄。1991。晒田對水稻磷之吸收及分蘗之影響 中華農藝 1: 277-291。

陳世雄。1992。土壤還原電位對水稻根活性與光合作用之影響。中華農藝 2: 169-181。

陳世雄、張倩玉、李健捀。1996。高土壤水分張力對水稻幼苗期根活性及生育之影響。中華農藝 6: 27-33。

鄧耀宗、黃伯恩。1993。台灣永續農業之現況與展望。p.1-8。永續農業研討會專集。台中區農業改良場編印，彰化縣。

Ackerson, R.C. 1981. Osmoregulation in cotton in response to water stress. II. Leaf carbohydrate status in relation to osmotic adjustment. Plant Physiol. 67: 489-493.

Ackerson, R. C. and R. R. Hebert. 1981. Osmoregulation in cotton in response to water stress. I. Alterations in photosynthesis, leaf conductance, transpiration, and ultrastructure. Plant Physiol. 67:484～488.

Banba, H. and T. Ohkubo. 1981. Relation between root distribution of upland crops and their yield. III. Influence of soil moisture levels on root distribution and root dry matter of upland-cultured paddy rice, crossbred rice of paddy rice and upland rice. Jap. Crop Sci. 50:1-7.

Black, C.A. 1968. Soil-Plant Relationship. John Wiley & Sons, Ins., New York

Chang, T. T., G. C. Loresto and O. Tagumpay. 1972. Agronomic and growth characteristics of upland and lowland rices. p.645-661. *In:* Rice Breeding. IRRI, ed. International Rice Research Institute, Los Banos, Luguna, Philippines.

Chang, T.T. and B.S. Vergara. 1975. Varietal diversity and morphoagronomic characteristics of upland rice. p.72-90. *In:* Major Research in Upland Rice. IRRI, ed. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Clark, F., D. C. Nearpass and A. W. Specht. 1957. Influence of organic additions and flooding on iron and manganese uptake by rice. Agron. J. 48: 586-589.

Cruz, R.T. and J. C. O'Toole. 1984. Dryland rice response to an irrigation gradient at flowering stage. Agron. J. 76:178-183.

Culter, J.M. and D.W. Rains. 1977. Effects of irrigation history on response of cotton to subsequent water stress. Crop Sci. 17: 329-335.

Culter, J. M. and D. W. Rains. 1978. Effects of water stress and hardening on the internal water relations and osmotic constituents of cotton leaves. Plant Physiol. 42: 261-268.

Culter, J. M., K. W. Shahan and P. L. Steponkus. 1980. Alteration of the internal water relations of rice in response to drought hardening. Crop Sci. 20: 307-310.

Dingkuhn, M., R. T. Cruz, J. C. O'Toole and K. Dorffing. 1989a. Net photosynthesis, water use efficiency, leaf water potential and leaf rolling as affected by water deficit in tropical upland rice. Aust. J. Agric. Res. 40: 1171-1182.

Dingkuhu, M., S. K. De Datta, K. Dorffling and C. Javellana. 1989b. Varietal differences in leaf water potential, leaf net CO_2 assimilation, conductivity and water use efficiency in upland rice. Aust. J. Agric. Res. 40: 1183-1192.

Fereres, E., E. Acevedo, D. W. Henderson and T.

C. Hsiao. 1978. Seasonal changes in water potential and turgor maintenance in sorghum and maize under water stress. Physiol. Plant. 44: 261-267.

Fortun, A., C. Fortun and C. Ortega. 1989. Effect of farmyard manure and its humic fractions on the aggregate stability of a sandy loam soil. J. Soil Sci. 40:293-298.

Gerard, C. J., P. Sezton and G. Shaw. 1982. Physical factors influencing soil strength and growth. Agron. J. 74: 875-879.

Glaszmann, J. C. 1985. A varietal lassification of Asian cultivated rice(*Oryza sativa* L.) based on isozyme polymorphism. p.83-90. In: Rice Genetices. IRRI, ed. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Gotoh, S. and K. Yamashita. 1966. Oxidation-reduction potential of a paddy soil in situ with special reference to the production of the ferrous iron, manganeous manganese and sulfide. Soil Sci. Plant Nutr. 12: 24-32.

Henson, I. E. 1982. Abscisic acid and water stress of rice (*Oryza sativa* L.) : sequential responses to water stress in the leaf. Ann. Bot. 50: 9-24.

Hsiao, T. C., E. Acevedo, E. Fereres and D. W. Henderson. 1976. Stress metabolism, water stress, growth and osmotic adjustment. Phil. Trans. R. Soc. London. B. 273: 490-500.

Hsiao, T. C., J. C. O'Toole, E. B. Yambao and N. C. Turner. 1984. Influence of osmotic adjustment on leaf rolling and tissue death in rice (*Oryza sativa* L.). Plant Physiol. 75: 338-341.

IRRI. 1963. Annual Report. Los Banos, Philippines.

IRRI. 1978. Annual Report. Los Banos, Philippines.

IRRI. 1983. Annual Report. Los Banos, Philippines.

Jones, M. M. and N. C. Turner. 1978. Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficit. Plant Physiol. 61: 122-126.

Jugsujinda, A. and W. H. Patrick, Jr. 1977. Growth and nutrient uptake by rice in a flooded soil under controlled aerobic-anaerobic and pH conditions. Agron. J. 69 :705-710.

Kawata, S. I., M. Katano and K. Yamazaki. 1977. Root system formation in rice plants in ill-drained and well-drained paddy field condition. Jap. J. Crop Sci. 46: 261-268.

Kung, P. 1971. Irrigation agronomy in monsoon Asia. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

Lal, R. 1985. Tillage in lowland rice-based cropping systems. p.283-307. Soil Physical and Rice.

Ludlow, M. M. 1980. Adaptive significance of stomatal response to water stress. *In:* Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress. N.C. Turner and P. J. Kramer, eds. A Wiley-Interscience Publication. New York.

Ofelia, S. N. and J. C. O'Toole. 1986. Reproductive stage water stress and sterility. I. Effect of stress during meiosis. Crop Sci. 26:317-321.

O'Toole, J. C. and R. T. Cruz. 1980. Response of leaf water potential, stomatal resistance, and leaf rolling to water stress. Plant Physiol. 65: 428-432.

Parao, F. T., E. Paningbatan and S. Yoshida. 1976. Drought resistance of rice varieties in relation to their root growth. Phil. J. Crop Sci. 1: 50-55.

Patrick, W. H., Jr. and R. Wyatt. 1964. Soil nitrogen loss as a result of alternate

submergence and drying. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28: 647-653.

Patrick, W. H., Jr. and I. C. Mahapatra. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen phosphorus in waterlogged soils. Adv. Agron. 20: 323-357.

Ponnamperuma, F. N., R. Bradfield and M. Peech. 1955. Physiological disease of rice attributable to iron toxicity. Nature. 175-265.

Ponnamperuma, F. N. 1967. Dynami aspects of flooded soil and the nutrient of the rice plant. p. 295-328. *In:* The Mineral Nutrition of the Rice Plant. IRRI, ed. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

Ponnamperuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. Adv. Agron. 24: 29-96.

Ponnamperuma, F. N. 1976. Physicochemical properties of submerged soils in relation to fertility p.1-26. *In:* The Fertility of Paddy Soils and Fertilizer Applications for Rice. FFTC/ASPAC, ed. Taipei, Taiwan.

Rahman, M. S. and S. Yoshida. 1985. Effect of water stress on grain filling in rice. Soil Sci. Plant Nutr. 31(4): 497-511.

Reddy, K. R., W. H. Patrick, Jr. and R. E. Philips. 1976. Ammonium diffusion as a factor in nitrogen loss from flooded soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 528-533.

Reganold, J. P. 1989. Comparison of soil properties as influenced by organic and conventional farming systems. Amer. J. Alternative Agri. 3:144-155.

Slatyer, R. O. and S. A. Taylor. 1960. Terminology in plant and soil-water relatrions. Nature 187: 922.

Su, K. C. 1987. Evolution of rice-based cropping pattern in Taiwan. p.37-47. *In:* Paddy Field Diversion and Upland Crop Production. Sung Ching and Dah-Jian Liu, eds. Special Pub. No.7 of Taichung DAIS, Chang-Hua, Taiwan.

Takai, Y., Y. Koyama and T. Kamura. 1956. Microbial metabolism in reduction process of paddy soils. Part I. Soil and Plant Food. 2: 63-66.

Thangaraj, M., J. C. O'Toole and S. K. De Datta. 1990. Root response to water stress in rainfed lowland rice. Expl. Agric. 26: 287-296.

Tolley, M. D., R. D. Delaune and W. H. Patrick, Jr. 1986. The effect of sediment redox potential and soil acidity on nitrogen uptake, anaerobic root respiration, and growth of rice (*Oryza Sativa*). Plant Soil 93: 323-331.

Turner, N. C. and M. M. Jones. 1980. Turgor maintenance by osmotic adjustment : review and evaluation. *In:* Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress. N. C. Turner and P. J. Kramer, eds. Wiley-Interscience Publication. New York.

Yahata, T. 1976. Physical properties of paddy soils in relation to their fertility p.28-35. *In:* The Fertility of Paddy Soils and Fertilizer Applications for Rice. FFTC/ASPAC, ed. Taipei, Taiwan.

Soil and Growth of Rice as Affected by Soil Moisture Regime

Jiann-Feng Lee *[1] and Shih-Shiung Chen[2]
[1]Taichung District Agricultural Improvement Station, COA, Chang-Hua, Taiwan, ROC
[2]Department of Agronomy, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail:lijiafen@tdais.gov.tw

ABSTRACT

Rice varieties bred in Taiwan had lower tolerance to drought in the vegetative growth stage. Generally drought tolerance in Japonica rice is lower than that of Indica rice. The advantages of submerged condition in the vegetative growth are that it provides more available soil nutrient and higher uptake efficiency. For rice grown in the second cropping season, it is suggested to practice soil-drying cycle at 29 days after transplanting to improve unfavorable soil environment. A depth of 5-7 cm irrigation is required in both the primary panicle formation stage and heading stage. During grain filling stage, results from field experiments showed that reduced irrigation water may give higher grain yield. The high soil moisture tension during grain filling stage reduced crude protein content of rice grain. When rice plant accumulated more-than-enough nitrogen content during grain filling stage, high soil moisture tension can reduce nitrogen uptake in rice and thus induce positive effect to grain quality.

Key words: Rice, Soil, Soil moisture regime, Yield, Rice quality.